

УДК 534.134

К.В. АВРАМОВ; О.В. ЖОЛОС

## СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТОНОСИТЕЛЕЙ

В данной работы рассматриваются свободные колебания оболочки ракетносителя, которая укреплена стрингерами и шпангоутами изнутри. Исследовалось влияние количества подкрепляющих элементов и площадь их поперечного сечения на динамические свойства ракетносителя под действием различных нагрузок: от обтекающего оболочку газового потока, динамические нагрузки от работы двигательной установки. В работе рассматриваются линейные колебания оболочки. Для расчета колебаний используется программный комплекс ANSYS.

**Ключевые слова:** ракетноситель, оболочка, стрингеры, шпангоуты, собственные частоты.

**Введение.** Оболочки, усиленные изнутри стрингерами и шпангоутами, широко используются в качестве обтекателей ракетносителей. Такие конструкции защищают спутник при выводе его на орбиту ракетой. Подчеркнем, что в настоящее время на орбиту в одном ракетносителе могут выводиться десятки спутников. Обтекатели ракетносителей состоят из конических и цилиндрических оболочек, которые крепятся друг к другу. Изнутри оболочки усиливаются стрингерами и шпангоутами. В процессе полета обтекатели ракетносителей подвержены действию различных нагрузок. Это нагрузки от обтекающего оболочку газового потока, динамические нагрузки от двигательной установки. Под действием этих нагрузок обтекатели могут совершать как свободные, так и вынужденные колебания.

Много усилий предпринято для исследования динамики оболочечных элементов ракетносителей [1]. Теория ребристых оболочек рассматривается в монографиях [2-4]. Приближенные методы расчета ребренных оболочек представлены в [5]. Расчет ребренных оболочек методом конечных элементов представлен в [6, 7].

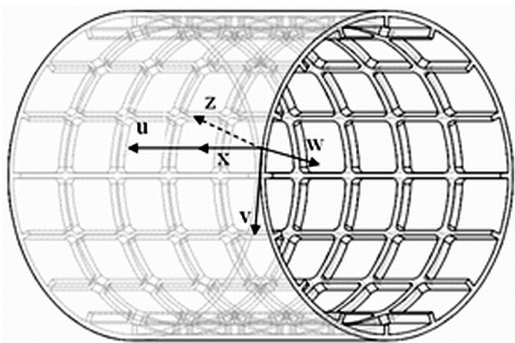


Рисунок 1 – Эскиз усиленной цилиндрической оболочки

**Цель работы:** исследовать свойства свободных колебаний обтекателей, которые моделируются тонкостенными оболочками со стрингерами и шпангоутами. Шпангоуты являются кольцами, которые размещаются на одинаковом расстоянии друг относительно друга в продольном направлении. Все кольца имеют квадратные, постоянные вдоль длины шпангоута поперечные сечения. Поперечные сечения всех колец одинаковы. Стрингеры размещаются внутри оболочки в ее продольном направлении. Стрингеры и

шпангоуты имеют одинаковые поперечные сечения. Они представлены на рис.1.

В работе рассматриваются линейные колебания оболочки. Предполагается, что перемещения являются малыми. Связь между напряжениями и деформациями удовлетворяет закону Гука. Для расчета колебаний используется программный комплекс ANSYS. В точках касания оболочки со стрингерами и шпангоутами предполагается, что перемещения одинаковые. Для дискретизации модели колебаний оболочки применялись конечные элементы SHELL 163. Для моделирования стрингеров и шпангоутов применяется конечный элемент BEAM 189, который использует модель балки Тимошенко. В качестве примера, разбиение участка конструкции на конечные элементы показан на рис. 2.

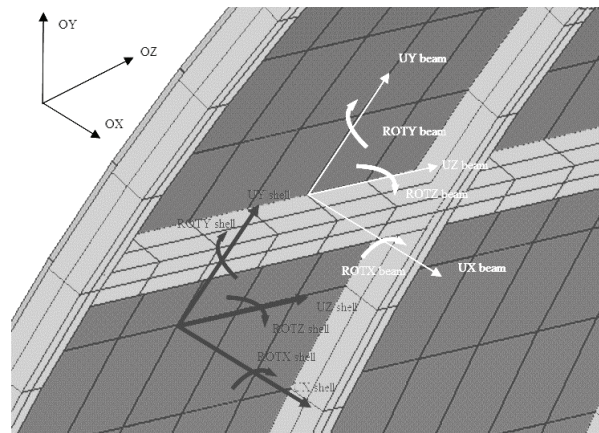


Рисунок 2 – Пример разбиения конструкции на конечные элементы

Численные значения параметров оболочки принимались следующими:

$$E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \quad \nu = 0.63; \quad \rho = 7870 \text{ кг/м}^3; \\ L = 8.41 \text{ м}; \quad h = 0.01 \text{ м}; \quad R = 1.95 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность материала конструкции;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $L$  – длина оболочки;  $h$  – толщина оболочки;  $R$  – радиус оболочки. В расчете принималось постоянное число шпангоутов 22, а число стрингеров варьировалось. Подчеркнем, что квадратные поперечные сечения стрингеров и шпангоутов также варьировались.

Результаты расчета собственных частот конструкции с 20; 30 и 40 стрингерами представлены в таб-

лице. Как видно из этой таблицы, собственные частоты при увеличении числа стрингеров немного уменьшаются. Это объясняется тем, что при увеличении числа стрингеров увеличивается масса конструкции, а жесткость конструкции на соответствующей форме колебаний не меняется. Цилиндрическая оболочка при колебаниях имеет много волн в окружном направлении. Именно такой изгиб вносит наибольший вклад в потенциальную энергию конструкции. Присутствие большего числа стрингеров не изменяет потенциальную энергию конструкции.

Таблица 1 – Собственные частоты конструкции

20 стрингеров		30 стрингеров		40 стрингеров	
№ собств. част.	С.Ч. [Гц]	№ собств. част.	С.Ч. [Гц]	№ собств. част.	С.Ч. [Гц]
1	33,171	1	32,686	1	32,198
2		2		2	
3	38,253	3	37,704	3	37,166
4		4		4	
5	41,057	5	40,334	5	39,616
6		6		6	
7	54,893	7	53,96	7	53,051
8		8		8	
9	56,184	9	55,061	9	53,979
10		10		10	
11	59,553	11	58,538	11	57,557
12		12		12	
13	60,872	13	59,755	13	59,688
14		14		14	
15	63,039	15	61,857	15	60,723
16		16		16	
17	75,466	17	73,845	17	72,304
18		18		18	
19	76,640	19	75,255	19	73,929
20		20		20	

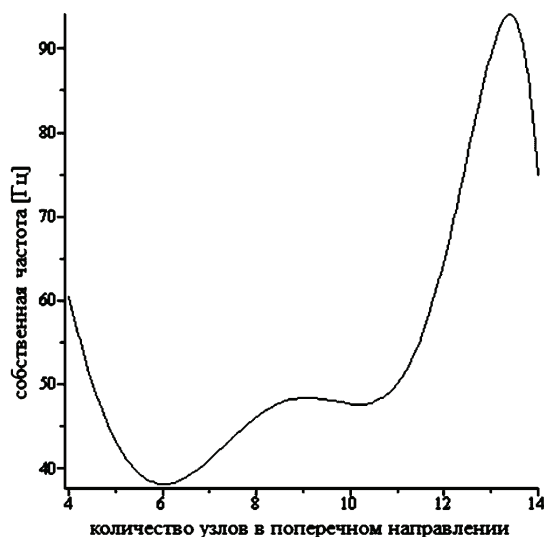


Рисунок 3 – График зависимости количества узлов в окружном направлении от величины собственных частот

Исследуем зависимость собственных частот обребенной конструкции от числа волн в окружном направлении. Для этого рассчитывались собственные частоты конструкции с параметрами (1), которая со-

держит 16 шпангоутов и 23 стрингера. Результаты расчетов представлены на рис. 3, где показан график зависимости собственных частот от числа узлов в окружном направлении. Минимальная собственная частота наблюдается при 6 узлах в окружном направлении. Отметим, что все полученные частоты являются кратными. Кратность собственных частот обусловлена осесимметричностью конструкции в окружном направлении.

Таблица 2 – Расслоение собственных частот конструкции

20 стрингеров		19 стрингеров		18 стрингеров	
№ собств. част.	С.Ч. [Гц]	№ собств. част.	С.Ч. [Гц]	№ собств. част.	С.Ч. [Гц]
1	33,171	1	33,180	1	33,253
2		2	33,272	2	33,309
3	38,253	3	38,273	3	38,322
4		4	38,343	4	38,404
5	41,057	5	41,064	5	41,239
6		6	41,238	6	41,257
7	54,893	7	54,895	7	55,094
8		8	55,095	8	55,097
9	56,184	9	56,192	9	56,377
10		10	56,451	10	56,541
11	59,553	11	59,567	11	59,702
12		12	59,751	12	59,832
13	60,872	13	60,937	13	61,029
14		14	61,056	14	61,227
15	63,039	15	63,057	15	63,264
16		16	63,354	16	63,435
17	75,466	17	75,475	17	75,667
18		18	75,89	18	76,117
19	76,640	19	76,626	19	76,806
20		20	76,89	20	76,949

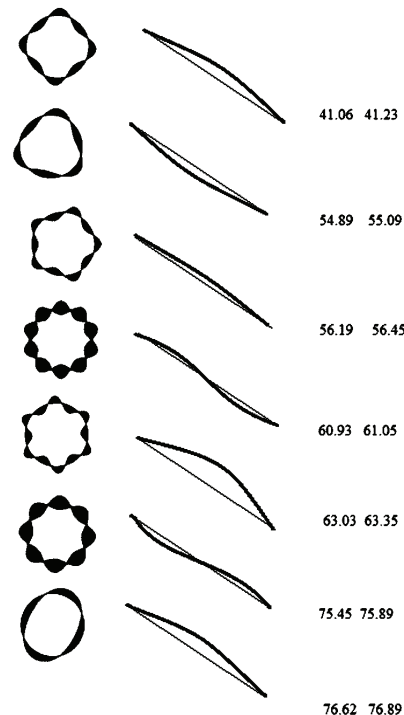


Рисунок 4 – Собственные формы обтекателя с 19 стрингерами

Теперь рассмотрим потерю кратности собственных частот вследствие потери осе симметричности конструкции. Для этого рассмотрим оболочку с 16 шпангоутами и 20 стрингерами, которые равномерно расположены по окружной координате оболочки. Результаты расчета собственных частот представлены во втором столбце табл. 2. Все, представленные в этом столбце собственные частоты, являются кратными. Теперь удалим один из 20 стрингеров. Тогда теряется осевая симметрия конструкции и как следствие собственные частоты расслаиваются. Такие собственные частоты представлены в четвертом столбце таблицы. В шестом столбце представлены собственные частоты конструкции без двух соседних стрингеров. Собственные формы колебаний цилиндрической оболочки с 19 шпангоутами представлены на рис. 4. Из этого рисунка можно сделать вывод о числе узлов в окружном и продольном направлении при колебаниях оболочки.

Исследовалось влияние размеров поперечного сечения стрингеров и шпангоутов на собственные частоты колебаний конструкции. Конструкция содержала 40 стрингеров и 16 шпангоутов. Рассмотрим колебания конструкции с усилениями в виде квадратных поперечных сечений следующих размеров:

1 – 5 мм; 2 – 4 мм; 3 – 3 мм; 4 – 2 мм.

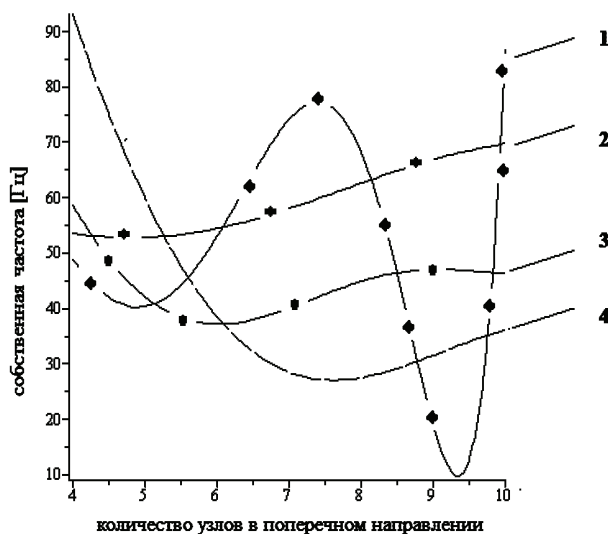


Рисунок 5 – Зависимости собственных частот от числа волн в окружном направлении

Результаты расчетов показаны на рис. 5. Здесь представлена зависимость собственных частот от чис-

ла узлов в окружном направлении. Цифрами указывается номер поперечного сечения, с которым производился расчет конструкции.

Поведение собственных частот в зависимости от числа узлов в окружном направлении качественно близко для конструкций с поперечными сечениями 2, 3, 4. Для конструкции с поперечным сечением 1 поведение собственных частот в зависимости от числа узлов в окружном направлении качественно отличается. Кривые 2, 3, 4 имеют один локальный минимум. Напомним, что номер 1 отвечает самым большим из рассматриваемых усилениям.

**Список литературы:** 1. Моссаковский В. И. Прочность ракетных конструкций / В. И. Моссаковский, А. Г. Макаренков, П. И. Никитин, Ю. И. Савин, И. Н. Спиридонов. – М.: Высшая школа, 1990. – 358 с. 2. Амиро И.Я. Теория ребристых оболочек / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий. – К.: Наукова думка, 1980. – 367 с. 3. Амиро И.Я. Устойчивость ребристых оболочек вращения / И. Я. Амиро, О. А. Грачев, В. А. Заруцкий, А. С. Пальчевский, Ю. А. Санников. – К.: Наукова думка, 1987, 180 с. 4. Андрианов И.В. Расчет прочности ребристых оболочек инженерных конструкций / И. В. Андрианов, В. А. Лесничая, В. В. Лобода, Л. И. Маневич. – Киев-Донецк: Вища школа, 1986. – 167 с. 5. Лизин В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1994. – 247 с. 6. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник / Под общей редакцией В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с. 7. Кармишин А.В. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций / А. В. Кармишин, В. А. Лясковец, В. И. Мяченков, А. Н. Фролов. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mossakovskij V. I. Prochnost' raketnykh konstrukcij. V. I. Mossakovskij, A. G. Makarenkov, P. I. Nikitin, Yu. I. Savin, I. N. Spiridonov. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 358 Print. 2. Amiro I.Ya. Teoriya rebristyh obolochek. I. Ya. Amiro, V. A. Zaruckij. Kyiv: Naukova dumka, 1980. 367 Print. 3. Amiro I.Ya. Ustojchivost' rebristyh obolochek vrascheniya. I. Ya. Amiro, O. A. Grachev, V. A. Zaruckij, A. S. Pal'chevskij, Yu. A. Sannikov. K.: Naukova dumka, 1987. 180 Print. 4. Andrianov I.V. Raschet prochnosti rebristyh obolochek inzhenernykh konstrukcij. I. V. Andrianov, V. A. Lesnichaya, V. V. Loboda, L. I. Manevich. Kyiv-Doneck: Vischa shkola, 1986. 167 Print. 5. Lizin V. T. Proektirovanie tonkostennykh konstrukcij. V. T. Lizin, V. A. Pyatkin. Moscow: Mashinostroyeniye, 1994. 247 Print. 6. Raschety mashinostroyitel'nykh konstrukcij metodom konechnykh elementov. Spravochnik / Pod obshej redakciej V.I. Myachenkova. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 456 Print. 7. Karmishin A.V. Statika i dinamika tonkostennykh obolochecnykh konstrukcij. A. V. Karmishin, V. A. Lyaskovets, V. I. Myachenkov, A. N. Frolov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 280 Print.

Поступила (received) 27.10.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Аврамов Константин Витальевич** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: 068 605 74 21; e-mail: kvavr@kharkov.ua

**Avramov Konstantin Vitalievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, leading Researcher of IPMach NAS of Ukraine, Kharkov; tel.: 068 605 74 21; e-mail: kvavr@kharkov.ua

**Жолос Ольга Валерьевна** – Національний технічний університет «ХПІ», аспірант кафедри ГТ, тел.: 063-327-37-12; e-mail: zholosolya@mail.ru

**Zholos Ol'ga Valer'evna** – National Technical University «KhPI», Postgraduate Student, tel.: 063-327-37-12; e-mail: zholosolya@mail.ru